

# 红外序列图像中缓动点目标的投影检测算法及其改进\*

陈非 敬忠良 李建勋

(上海交通大学航空航天信息与控制研究所, 电子信息学院, 上海, 200030)

**摘要** 应用形态学滤波算法获得红外图像的背景, 利用局域窗口估计的噪声均值和方差对噪声进行归一化, 将归一化图像在时域上构成组合帧, 然后在组合帧内对目标进行统计检测, 分析得到了目标及噪声在组合帧中的统计分布. 针对噪声和目标幅值的不同分布特性, 进一步对投影算法进行了改进, 提高了投影算法的信噪比. 实际红外图像仿真表明, 该算法可以成功检测信噪比为2的目标.

**关键词** 目标检测, 形态学滤波, 红外图像序列, 低信噪比, 点目标.

## IMPROVEMENT TO PROJECTION DETECTION OF SLOWLY MOVING POINT TARGET IN INFRARED IMAGE SEQUENCES\*

CHEN Fei JING Zhong-Liang LI Jian-Xun

(Institute of Aerospace Information and Control, School of Electronics and Information Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The infrared image background is obtained by morphological filtering, and the infrared images are normalized using the estimated noise mean and variance in a local window. Composite frame is formed by normalized image data, and target detection is performed on the composite frame. Thus, target and noise statistics in a composite frame are obtained. Considering the different distribution of noise and target intensity, the projection algorithm is further modified to improve its signal-to-noise ratio. Simulations of real infrared images proved that the modified projection algorithm can successfully detect targets with SNR equaling 2.

**Key words** target detection, morphological filtering, infrared image sequences, low SNR, point target.

### 引言

低信噪比复杂背景中的小目标检测一直是个难以解决的问题, 单帧检测可能产生很多虚假目标, 无法获取所要求的检测概率和虚警概率. 根据目标运动的规律性和连续性, 可以通过序列图像处理, 利用时间上的信息来进一步确认真实目标, 成为可行的解决途径.

70年代末以来, 针对运动小目标的检测已经提出了一些方法. Reed<sup>[1,2]</sup>和Porat<sup>[3]</sup>设计了三维匹配滤波器, 当假设的目标轨迹和真实目标轨迹一致时, 输出信噪比最大. Blostein<sup>[4,5]</sup>提出了截断序贯似然

比检测方法, 它本质上也是一种三维匹配滤波器法, 但数据的树型组织与截断方法显著减少了计算量. Barniv<sup>[6]</sup>利用动态规划法来检测运动小目标. 以上方法的缺点是, 当目标的位置、运动速度的大小及方向未知的情况下, 从每一像素点起始的可能目标轨迹将呈指数增长, 导致难以实时实现. 其他方法还有神经网络法<sup>[7]</sup>, 高阶相关法<sup>[8]</sup>等.

陈颖<sup>[9]</sup>利用职权差分帧投影来构成组合帧, 并沿不同方向对像素值进行累加, 进而通过统计分析确定检测门限, 但文中推导隐含假设了目标运动速度为1像素/帧. Chu<sup>[10]</sup>提出了小目标检测的最优投影算法, 并指出投影算法会导致信噪比下降.

\* 国家863计划(批准号2001AA135091)和上海市科技发展基金(批准号015115038)资助项目

稿件收到日期2002-05-29, 修改稿收到日期2002-12-16

\* The project supported by the 863 Program of China (No. 2001AA135091) and Shanghai Science and Technology Development Foundation (No. 015115038)

Received 2002-05-29, revised 2002-12-16

投影法小目标检测具有计算量小的优点, 适合实时运算. 本文的目的就是在保证算法实时性的同时, 提高投影法检测的信噪比. 文中首先通过形态学滤波算法获取红外图像的背景, 利用局域窗口估计的噪声均值和方差对噪声进行归一化, 然后根据最大目标运动速度将归一化的图像构成组合帧. 分析得到了目标及噪声在组合帧中的统计分布, 针对噪声和目标的不同分布特性, 进一步对投影算法进行了改进, 提高了投影算法的信噪比. 实际图像仿真表明, 本文算法可以成功检测信噪比为 2 的目标.

### 1 红外图像数据模型及图像预处理

包含有点目标的红外场景图像可以描述为  $f(x, y, k) = f_T(x, y, k) + f_B(x, y, k) + n(x, y, k)$ , (1) 式中  $f(x, y, k)$  是第  $k$  帧像素点  $(x, y)$  的灰度值,  $f_T(\cdot)$ 、 $f_B(\cdot)$  分别表示目标及背景的幅值,  $n(\cdot)$  为零均值测量噪声.

在目标检测前, 首先需要去除图像背景. 数学形态学对图像处理具有直观上的简明性和数学上的严谨性, 而且其算法都可以并行实现, 因此在图像处理中获得了广泛的应用. 近年来, 许多国内外学者都在致力于这方面的研究和探索<sup>[11-13]</sup>. 有关研究表明, 数学形态学滤波比线性的背景估计算法有更好的性能. 本文采用数学形态学算法对红外图像进行处理来获取图像背景.

用结构元素  $b$  对输入图像  $f$  进行灰度膨胀和腐蚀分别记为

$$(f \oplus b)(x, y) = \max \{ f(x-s, y-t) + b(s, t) \mid (x-s), (y-t) \in D_f, (s, t) \in D_b \}, \quad (2)$$

$$(f \ominus b)(x, y) = \min \{ f(x+s, y+t) - b(s, t) \mid (x+s), (y+t) \in D_f, (s, t) \in D_b \}, \quad (3)$$

式中  $D_f$  和  $D_b$  分别是  $f$  和  $b$  的定义域.

用结构元素  $b$  对输入图像  $f$  进行灰度开启和闭

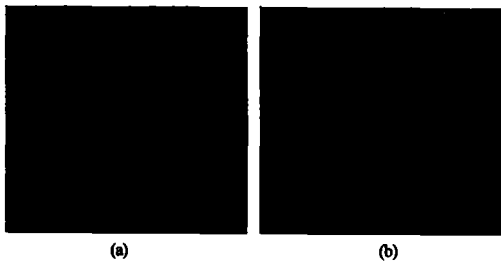


图 1 图像背景估计 (a) 实际红外图像 (b) 数学形态学滤波获取的图像背景

Fig. 1 Image background estimation (a) real infrared image (b) estimated image background

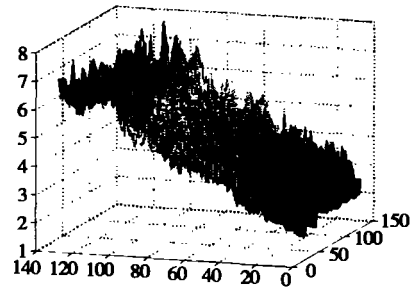


图 2 图像各像素点标准差

Fig. 2 Standard deviation of infrared image

合分别记为

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b, \quad (4)$$

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b. \quad (5)$$

实际中常用开启操作消除与结构元素相比尺寸较小的亮噪声, 用闭合操作消除与结构元素相比尺寸较小的暗噪声, 并保持图像整体灰度值和大的亮、暗区域基本不受影响. 由于远距离目标在红外图像中表现为小的亮点和亮斑, 因此, 本文用  $5 \times 5$  全零平顶形结构元素对红外图像进行开启然后再闭合操作, 以去除各类亮、暗噪声及小目标, 获得图像背景. 图 1(a) 所示为实际红外图像, 由于目标很小且信噪比很低, 因此无法用肉眼辨别目标, 图 1(b) 为数学形态学滤波得到的图像背景.

### 2 红外图像噪声特性

在很多小目标检测文献中, 都假设噪声分布在时间及空间上都是平稳的, 然而实际图像并非如此. 通过图像序列来估计图像各个像素点的方差大小

$$\hat{\sigma}_{x,y}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_{x,y,k} - \hat{\mu}_{x,y,k})^2, \quad (6)$$

式中  $f_{x,y,k}$  表示第  $k$  帧像素点  $(x, y)$  的灰度值,  $\hat{\mu}_{i,j,k}$  是形态学滤波获得的背景,  $N$  为处理的帧数. 图 2 所示为通过 70 帧实际图像估计的图像各像素点的

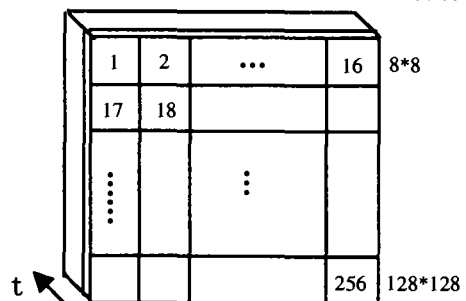


图 3 邻域  $8 \times 8$  窗口

Fig. 3  $8 \times 8$  small windows

标准差  $\hat{\sigma}_{x,y}$ ). 从图 2 可以看出, 红外图像噪声在空间上是非平稳的, 灰度大的区域方差大.

下面我们利用统计学中的偏态和峰态来进一步研究噪声的统计特性.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{偏态: } \gamma_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \\ \text{峰态: } \gamma_k = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \end{array} \right. \quad (7)$$

式中  $\mu_3, \mu_4$  分别为样本的三、四阶中心矩,  $\sigma$  为样本的标准差.

图像噪声在空间上是非平稳的, 我们将原图像分割成一个个  $8 \times 8$  的小窗口如图 3 所示, 并研究噪声在短时间(10 帧)中的统计特性.

总体服从正态分布且样本容量  $n$  较大 ( $> 100$ ) 时, 偏态和峰态的统计量  $\gamma_s, \gamma_k$  都接近于正态变量, 它们的均值和方差为

$$\begin{aligned} E(\gamma_s) &= 0 & D(\gamma_s) &= 6/n, \\ E(\gamma_k) &= 0 & D(\gamma_k) &= 24/n. \end{aligned} \quad (8)$$

给定 95% 的置信度, 那么它们的置信区间分别为

$$\begin{aligned} -2\sqrt{\frac{6}{n}} &\leq \gamma_s \leq 2\sqrt{\frac{6}{n}} \\ -2\sqrt{\frac{24}{n}} &\leq \gamma_k \leq 2\sqrt{\frac{24}{n}}, \end{aligned} \quad (9)$$

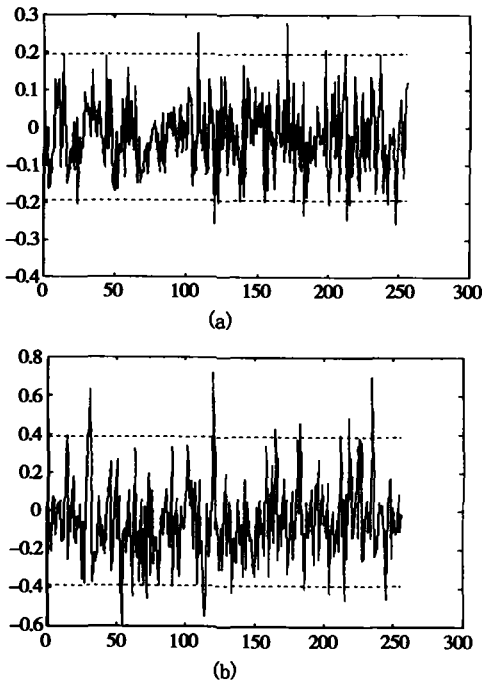


图 4 各邻域窗口的偏态和峰态曲线 (a) 偏态 (b) 峰态

Fig. 4 Skewness and kurtosis of all windows (a) skewness (b) durtosis

图 3 中对于 10 帧图像每一个窗口,  $n = 8 \times 8 \times 10 = 640$ . 图 4 为所有窗口的偏态和峰态, 虚线之间为求得的置信区域.

从图中可以得出结论, 短时间局域窗口的噪声可以近似认为时间、空间平稳的正态噪声过程.

### 3 缓动点目标投影检测算法及其改进

#### 3.1 缓动点目标投影检测算法

文献[9]利用投影算法进行小目标的检测, 计算量小, 但在算法的推导中隐含假设目标的运动速度为 1 像素/帧. 当目标速度小于 1 像素/帧时, 差分运算会把目标能量减掉. 这里也采用投影算法, 但本文没有利用差分帧来构成组合帧, 从而克服了当目标运动速度缓慢时算法性能下降的缺点.

将序列图像归一化, 然后在时域上组合,

$$U(x_i, y_j) = \sum_{k=1}^l \left( \frac{S(x_i, y_j, k)}{\sigma_{ij}(k)} \right)^2,$$

$$S(x_i, y_j, k) = f(x_i, y_j, k) - f_B(x_i, y_j, k), \quad (10)$$

式中  $f(\bullet)$  为实际红外图像,  $f_B(\bullet)$  为形态学滤波获得的背景,  $\sigma_{ij}(k)$  为通过  $(k-9)$  到  $k$  帧估计的各像素点的标准差,  $l$  为组合帧数,  $l$  的选取与目标最大运动速度有关.

对于组合帧中的各个像素点, 其统计分布在有目标和无目标两种情况下是不同的. 当某点不含目标时, 该点幅值服从自由度为  $l$  的  $\chi^2$  分布

$$U(x_i, y_j) \sim \chi^2(l), \quad (11)$$

当某点含有目标时, 由于目标移动缓慢, 前后帧目标可能在某点重叠. 假设有  $P$  帧图像(第  $k_1, k_2, \dots, k_p$  帧)中目标在该点重叠, 且目标幅值在短时间变化不大, 则

$$\begin{aligned} U(x_i, y_j) &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq k_1, \dots, k_p}}^l \left( \frac{n(x_i, y_j, k)}{\sigma_{ij}(k)} \right)^2 \\ &\quad + \sum_{k=k_1, \dots, k_p} \left( \frac{f_T(x_i, y_j) + n(x_i, y_j, k)}{\sigma_{ij}(k)} \right)^2 \\ &= U_0(x_i, y_j) + U_1(x_i, y_j), \end{aligned} \quad (12)$$

由于有  $SNR = \frac{f_T(x_i, y_j)}{\sigma_{ij}(k)}$ , 因此此时该点幅值前一项服从自由度为  $(l-p)$  的  $\chi^2$  分布

$$U_0(x_i, y_j) \sim \chi^2(l-p), \quad (13)$$

后一项服从自由度为  $p$  的非中心  $\chi^2$  分布

$$U_1(x_i, y_j) \sim \chi^2(p, p \times SNR^2), \quad (14)$$

根据  $\chi^2$  分布的性质: 若  $X_i, i=1, 2, \dots, n$  独立且服从非中心  $\chi^2$  分布  $\chi^2(n_i, \lambda_i)$ , 则  $\sum_{i=1}^n X_i$  服从  $\chi^2$

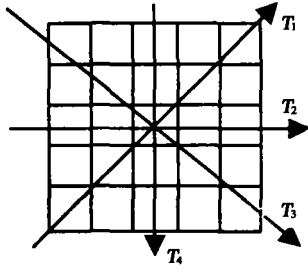


图5 目标搜索方向  
Fig.5 Target search direction

$(\sum_{i=1}^n n_i, \sum_{i=1}^n \lambda_i)$ ;  $\chi^2$  分布是  $\lambda = 0$  的非中心  $\chi^2$  分布的特例. 由(13)(14)可知, 当某点有目标时, 该点幅值服从自由度为  $l$  的非中心  $\chi^2$  分布

$$U(x_i, y_j) \sim \chi^2(l, p \times \text{SNR}^2). \quad (15)$$

由于目标距离远, 机动性小, 因此可以假设在短时间内, 目标作匀速直线运动. 在组合帧中, 对图像每个像素点定义一个  $r \times r$  小邻域, 按可能的 4 个方向搜索目标轨迹, 如图 5 所示.

将可能轨迹上的像素值累加得

$$Z_{ij} = \sum U(x_m, y_n) \quad m, n \in T_q, \quad q = 1, 2, 3, 4$$

$$T = \{T_1, T_2, T_3, T_4\}, \quad (16)$$

根据  $\chi^2$  分布的性质, 当目标不存在时,  $Z_{ij} \sim \chi^2(r \times l)$ ; 当搜索方向正好为目标运动轨迹时,  $Z_{ij} \sim \chi^2((r - 1) \times l, \text{SNR}^2 \times l)$ .

### 3.2 投影检测算法的改进

当信噪比为 2 时, 归一化的噪声与信号的概率密度函数如图 6 所示, 从图中可以看出, 信号的分布主要在正半轴, 而在负半轴出现可以认为是小概率事件.

利用式(10)进行时域组合前, 先进行以下非线性映射

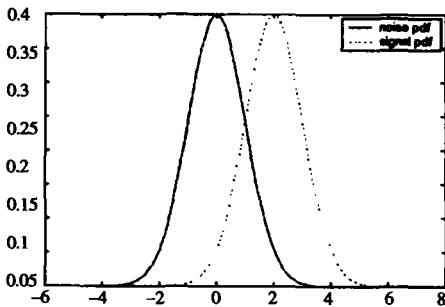


图6 噪声与信号的概率密度函数  
Fig.6 Probability distribution function of noise and signal

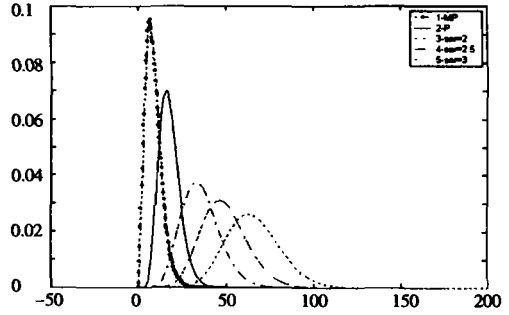


图7 统计量分布曲线  
Fig.7 Statistics distribution curve

$$S'(x_i, y_j, k) = \begin{cases} S(x_i, y_j, k) & S(x_i, y_j, k) \geq 0 \\ 0 & S(x_i, y_j, k) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

形态学滤波预白化后的图像经过(17)式非线性变换, 然后在时域投影组合

$$U(x_i, y_j) = \sum_{k=1}^l \left( \frac{S'(x_i, y_j, k)}{\sigma_{ij}(k)} \right)^2. \quad (18)$$

当信噪比为 2 时, 目标幅度值 95.4% 的可能性分布在 2 倍标准差范围内  $[0 \sim 4]$ , 如图 6 所示. 目标幅值只有 2.3% 的可能为负, 可以看成小概率事件, 如果组合帧某点有目标时, 该点  $Z_{ij}$  仍近似服从非中心  $\chi^2$  分布:  $Z_{ij} \sim \chi^2((r - 1) \times l, \text{SNR}^2 \times l)$ . 而式(17)是非线性的, 因此当目标不存在时, 在投影图像中按不同方向搜索目标时,  $Z_{ij}$  的分布函数难以通过解析方法推导. 需要通过大量数据来近似  $Z_{ij}$  的分布函数.

### 4 改进投影算法的性能分析及实验结果

为了分析算法的性能, 我们求出投影算法、改进投影算法在有、无目标时不同信噪比条件下的统计量  $Z_{ij}$  分布, 取组合帧数  $l = 6$ , 邻域大小  $r = 3$ , 各曲线如图 7 所示.

图 7 中, 曲线 1 为无目标时改进投影算法的统计量分布曲线, 曲线 2 为无目标时投影算法的统计量分布曲线, 曲线 3、4、5 分别为信噪比 SNR 为 2、2.5、3 时有目标条件下的统计量分布曲线. 可以看出, 改进投影算法使得有、无目标时统计量的分布曲线距离拉开, 曲线重叠区域减小, 相当于提高了投影算法的信噪比, 这样就可以使检测算法的平均错误概率(同时考虑漏检概率和虚警概率)减小, 提高检测算法的检测性能. 从图中还可以看到, 当信噪比为 3 时, 改进投影算法有、无目标情况下统计量分布曲线已经几乎不重叠.

表 1 所列为不同信噪比条件下投影算法 (PA: Projection Algorithm) 和改进投影算法 (MPA: Modi-

fied Projection Algorithm) 的检测概率值比较。

表 1 不同信噪比下的检测概率值

Table 1 Detection probability under different SNR

SNR	Pf	PA	MPA
3	le-3	0.994	0.999
	le-4	0.988	0.993
	le-5	0.962	0.984
2.5	le-3	0.908	0.949
	le-4	0.816	0.863
	le-5	0.628	0.732
2	le-3	0.559	0.701
	le-4	0.346	0.502
	le-5	0.175	0.317

下面利用本文提出的改进投影检测算法对实际红外图像进行点目标检测。实际红外图像序列的图像大小为  $128 \times 128$ , 图像像素灰度值为 8 位, 图像的信噪比为 2 左右, 目标作近似匀速直线运动, 速度小于 1 像素/帧。目标检测结果如图 8 所示。

## 5 结论

由于没有目标的大小、尺寸、形状和纹理等信息, 复杂背景中的小目标检测一直是个难以解决的问题。当图像信噪比很低时, 单帧图像的目标检测无法获得满意的检测概率和虚警概率, 只能通过图像序列累加不同帧上未知轨迹的目标能量来进一步确认真实目标。

本文研究了低信噪比红外图像序列中缓动小目标的检测问题。

1. 通过形态学滤波算法获得图像的背景。由于形态学算子可以并行计算, 因此可以大大提高处理速度。

2. 通过真实红外图像数据验证了红外图像噪声在空间上是非平稳的, 然后利用偏态和峰态深入分析了复杂背景红外图像的噪声特性, 进而将噪声进行归一化。

3. 根据最大目标运动速度将归一化后的图像构成组合帧。由于没有使用差分帧, 因此克服了当目标速度小于 1 像素/帧时文献[9]算法的缺点。修正



图 8 实际红外图像序列和检测出的小目标及其轨迹

Fig. 8 Detected target and its track in real infrared image sequence

了目标及噪声在组合帧中的统计分布。

4. 针对噪声和目标的不同分布特性, 进一步对投影算法进行了改进, 通过比较得出改进投影算法提高了投影检测算法的信噪比。

实际图像序列的检测结果表明本算法可以有效检测出信噪比为 2 的缓动点目标。本文的方法在目标的速度为 1 像素/帧以下时可以获得满意的效果, 但当目标速度增大时, 性能会有所下降; 如果考虑目标的轨迹为圆轨迹时, 需要在投影及搜索方向中增加圆轨迹搜索方向, 但在目标距离远时, 目标的机动性弱, 可以近似用直线搜索方向来简化算法。

## REFERENCES

- [1] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L. Optical moving target detection with 3-D matched filtering. *IEEE Trans. AES.*, 1988, **24**(4): 327—335
- [2] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L. A recursive moving-target-indication algorithm for optical image sequences. *IEEE Trans. AES.*, 1990, **26**(3): 434—439
- [3] Porat B, Friedlander B. A frequency domain algorithm for multiframe detection and estimation of dim targets. *IEEE Trans. PAMI.*, 1990, **12**(4): 398—401
- [4] Blostein S D, Huang T S. Detecting small, moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing. *IEEE Trans. SP.*, 1991, **39**(7): 1611—1629
- [5] Blostein S D, Richardson H S. A sequential detection approach to target tracking. *IEEE Trans. AES.*, 1994, **30**(1): 197—212
- [6] Barniv Y. Dynamic programming solution for detection dim moving targets. *IEEE Trans. AES.*, 1994, **30**(1): 197—212
- [7] Shirvaikar M V, Trivedi M M. A neural network filter to detect small targets in high clutter backgrounds. *IEEE Trans. NN.*, 1995, **6**(1): 252—257
- [8] Liou R J, Azimi-Sadjadi M R. Dim target detection using high order correlation method. *IEEE Trans. AES.*, 1993, **29**(3): 841—856
- [9] CHEN Ying, LIU Lian-Fu, LI Zai-Ming. A fast detection algorithm of dim point moving target using statistical analysis. *Chinese Journal of Electronics* (陈颖, 刘镰斧, 李在铭. 一种微弱点运动目标的快速统计检测算法. *电子学报*), 2001, **29**(12): 707—709
- [10] Chu P L. Optimal projection for multidimensional signal detection. *IEEE Trans. ASSP.*, 1988, **36**(5): 775—786
- [11] Won Y. Morphological shared-weight networks with applications to automatic target recognition. *IEEE Trans. NN.*, 1997, **8**(5): 1195—1203
- [12] Ritter G X. Morphological associative memories. *IEEE Trans. NN.*, 1998, **9**(2): 281—292
- [13] YU Nong, LI Yu-Shu, Wang Run-Sheng. Optimal morphological filters using genetic algorithm for automatic target detection. *Chinese J. Computers* (余农, 李予蜀, 王润生. 自动检测图像目标的形态滤波遗传算法. *计算机学报*), 2001, **24**(4): 337—346